

**А. В. КИПЕНСКИЙ, Е. И. КОРОЛЬ, Н. И. ГОРОВЫХ**

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРЕХФАЗНОГО ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА**

В работе проанализированы схемы трехфазных тиристорных преобразователей переменного напряжения для регулирования мощности в устройствах электронагрева. Произведено сравнение их энергетических показателей. Для трехфазного преобразователя предложен новый способ оптимального управления. Суть предложенного способа состоит в том, что для обеспечения заданной мощности в нагрузке, формируется такая комбинация углов управления силовыми ключами, при которой обеспечивается наилучшее из возможных значений того или иного энергетического показателя.

**Ключевые слова:** тиристорный преобразователь, устройства электронагрева, фазоступенчатое регулирование мощности, энергетические показатели, оптимальное управление.

**А. В. КИПЕНСЬКИЙ, Є. І. КОРОЛЬ, М. І. ГОРОВИХ**

## **ПОЛІПШЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТРИФАЗНОГО ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ПРИСТРОЇВ ЕЛЕКТРОНАГРІВУ**

В роботі проаналізовані схеми трифазних тиристорних перетворювачів змінної напруги, що використовують для регулювання потужності в пристроях електронагріву. Проведено порівняння їх енергетичних показників. Для трифазного перетворювача запропоновано новий спосіб оптимального управління. Суть запропонованого способу полягає в тому, що для забезпечення заданої потужності в навантаженні, формується така комбінація кутів управління силовими ключами, при якій забезпечується найкраще з можливих значень того чи іншого енергетичного показника.

**Ключові слова:** тиристорний перетворювач, пристрої електронагріву, фазоступеневе регулювання потужності, енергетичні показники, оптимальне керування.

**A. KIPENSKYI, I. KOROL, N. GOROVYKH**

## **IMPROVEMENT THE ENERGY PERFORMANCE OF A THREE-PHASE THYRISTOR CONVERTER FOR ELECTRIC HEATING DEVICES**

Various schemes of three-phase thyristor AC voltage converters for power control in electric heating devices are analyzed in paper. The peculiarity of the considered converters is that the phase and line voltages of the three-phase mains supply are used together to control the power in the load (phase-by-stage regulation). Comparison of their energy parameters, which assess the electromagnetic compatibility of the converter with the power supply system, has been made. It is shown that such converters have a higher power factor, the value of which also significantly depends on the method of controlling the power switches. For a three-phase converter, in which each phase voltage was simultaneously combined with two linear - leading and lagging, a new optimal method control was proposed. The essence of the proposed method is that in order to ensure a given power value in the load, such a combination of the control angles of the power switches is formed, at which the best possible value of one or another energy parameter is ensured. The results of studies of changes in energy parameters as a function of active power in the load while optimizing the power factor, shear factor and distortion factor are presented. Researches have shown that the method of optimal control of a three-phase AC voltage converter is especially useful at high load powers with a large thermal time constant.

**Keywords:** thyristor AC voltage converters, electric heating devices, phase-by-stage regulation, energy parameters, optimal method control.

**Введение.** Трехфазные полупроводниковые преобразователи переменного напряжения (ППН) средней и большой мощности широко используются для регулирования активной мощности в различного рода устройствах электронагрева и промышленных электропечах сопротивления [1]. Форма тока нагрузки в таких устройствах принципиального значения не имеет, поэтому при выборе силовой схемы ППН и способов управления основное внимание принято уделять электромагнитной совместимости преобразователей с системой электроснабжения, которая оценивается некоторой совокупностью энергетических показателей, а также стоимости ППН.

Для улучшения энергетических показателей полупроводниковых преобразователей достаточно часто применяются входные пассивные или активные фильтры [2]. Такой подход оказывается целесообразным, если в качестве ключевых элементов используются мощные биполярные транзисторы с изолированным затвором, которые позволяют применять в трехфазных

ППН методы широтно-импульсной модуляции с частотой  $2\div 3$  кГц [3]. Однако при больших мощностях приходится использовать запираемые тиристоры с меньшей частотой коммутации, что ухудшает массогабаритные показатели входных фильтров. Увеличение частоты коммутации в ППН с запираемыми тиристорами приводит к возрастанию мощности потерь в силовых ключах и соответственно к снижению коэффициента полезного действия преобразователя.

Другой подход к улучшению энергетических показателей вообще, и к увеличению коэффициента мощности трехфазных ППН для нагревательных устройств, в частности, при небольшой частоте переключения силовых ключей состоит в секционировании нагрузки и согласованном управлении преобразователями секций [4].

Одновременное использование фазных и линейных напряжений трехфазной питающей сети для регулирования мощности в нагрузке, позволяет реализовать качественно другой подход к построению ППН.

Такое регулирование мощности принято называть фазоступенчатым. Так как каждая фаза трехфазной сети переменного напряжения используется для формирования двух линейных напряжений, то возможны и два варианта построения силовых схем.

В ППН, приведенном на рис. 1, а, фазные напряжения  $u_A$ ,  $u_B$  и  $u_C$  сочетаются с линейными напряжениями  $u_{AB}$ ,  $u_{BC}$  и  $u_{CA}$ , опережающими соответствующие фазные напряжения на угол  $\pi/6$  [5]. Во втором ППН (см. рис. 1, б) фазным напряжениям  $u_A$ ,  $u_B$  и  $u_C$  соответствуют отстающие на угол  $\pi/6$  линейные напряжения  $u_{AC}$ ,  $u_{BA}$  и  $u_{CB}$  [6]. В обоих случаях силовые ключи  $S$  могут быть реализованы путем встречно-параллельного соединения тиристоров.

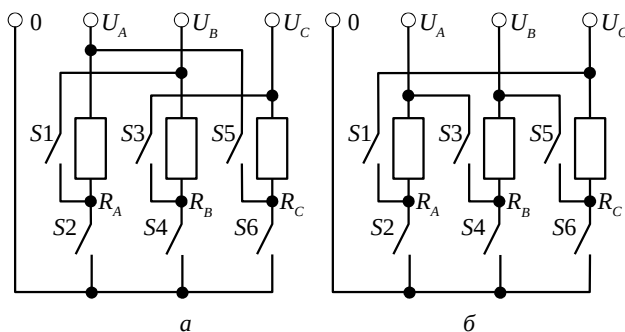


Рис. 1. ППН с фазоступенчатым регулированием

Рассмотренные схемы трехфазных ППН с фазоступенчатым регулированием обладают повышенным коэффициентом мощности. К недостаткам схемы, приведенной на рис. 1, а, может быть отнесен скачок регулировочной характеристики, наличие которого снижает устойчивость системы автоматического регулирования мощности в нагрузке. Регулировочная характеристика второго ППН – непрерывна.

Для модернизации трехфазных печей сопротивления мощностью от 14,6 до 58 кВА авторами были использованы ППН (см. рис. 2), где каждое фазное напряжение одновременно сочеталось с двумя линейными – опережающим и отстающим, что позволило получить дополнительное повышение коэффициента мощности [7, 8].

Одним из наиболее простых и достаточно эффективных способов регулирования мощности в нагрузке ППН, схема которого приведена на рис. 2, является регулирование в три этапа [7].

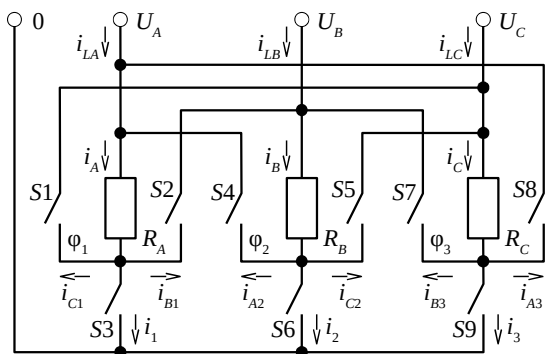


Рис. 2. ППН с фазоступенчатым регулированием и повышенным коэффициентом мощности

Зависимость коэффициента мощности  $\lambda_2$  ППН при трехэтапном способе регулирования от относительного значения активной мощности  $P^*$  в нагрузке показана кривой на рис. 3. Здесь же показано изменение коэффициента мощности  $\lambda_1$  для ППН, схема которого приведена на рис. 1, б.

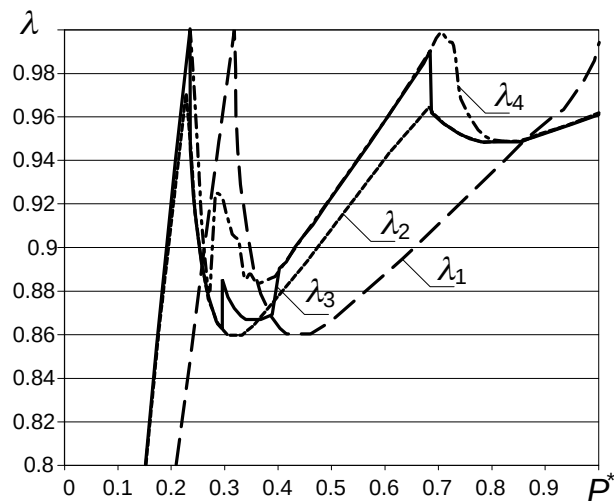


Рис. 3. Зависимость коэффициента мощности ППН от относительного значения активной мощности в нагрузке при различных способах регулирования

Сравнение кривых на рис. 3 показывает, что во втором случае (ППН на рис. 2, трехэтапный способ регулирования) значение коэффициента мощности по сравнению с упрощенной схемой (ППН на рис. 1, б) повышается практически во всем диапазоне регулирования мощности в нагрузке. В частности, среднее значение коэффициента мощности в начальном диапазоне регулирования увеличивается на 11 %. Кроме того, в 1,33 раза расширяется диапазон регулирования мощности при среднем значении коэффициента мощности равно 0,94.

Применение микропроцессорных систем для управления силовыми ключами ППН (рис. 2) позволяет включать их в произвольном порядке за период напряжения сети при сохранении сетевой коммутации тиристоров. За счет усложнения алгоритма управления был разработан способ регулирования выходной мощности ППН в пять этапов [7]. Фазовые и регулировочные характеристики при пятиэтапном способе регулирования мощности в нагрузке ППН имеют более сложный характер, а коэффициент мощности  $\lambda_3$  (рис. 3) оказывается больше, чем при трехэтапном способе управления (коэффициент мощности  $\lambda_2$ ). Кроме того, можно отметить, что при пятиэтапном способе управления коэффициент мощности достигает единичного и близкого к нему значения в двух точках, соответственно, при мощности в нагрузке 0,235 ( $\lambda = 1$ ) и 0,68 ( $\lambda = 0,99$ ).

Цель данной работы состоит в дальнейшем совершенствовании способов регулирования мощности в нагрузке трехфазного тиристорного преобразователя за счет формирования такой комбинации углов управления силовыми ключами, при которой заданная

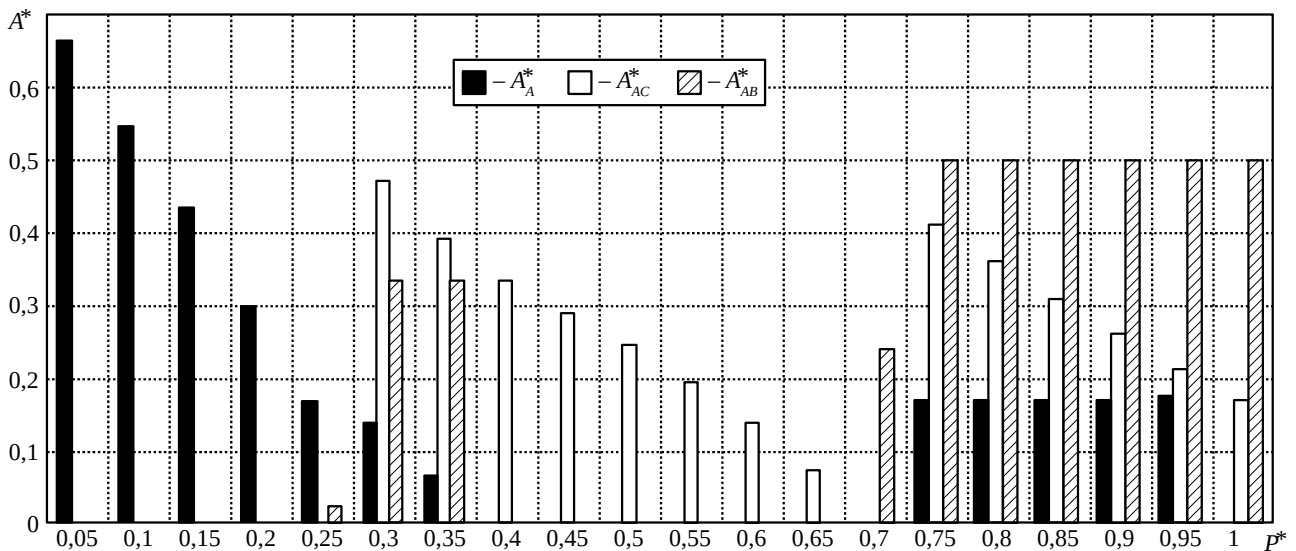


Рис. 4. Изменения углов управления силовыми ключами ППН при оптимальном управлении для получения наибольшего значения коэффициента мощности

мощность в нагрузке будет обеспечиваться при наилучшем из возможных значений того или иного энергетического показателя.

**Способ оптимального управления.** Решение поставленной задачи осуществлялось с использованием математической модели ППН и методов оптимизации, где в *первом случае* в качестве критерия оптимальности был выбран коэффициент мощности. На рис. 4 в виде столбчатых диаграмм приведены относительные значения углов управления силовыми ключами (см. рис. 2), которые коммутируют напряжения фазы А (черные столбики) и соответствующих линейных напряжений АС (белые столбики) и АВ (заштрихованные столбики) в функции относительного значения активной мощности в нагрузке (относительную мощность в нагрузке изменяли с шагом 0,05).

Предложенный способ управления повышает коэффициент мощности  $\lambda_4$  (рис. 3) по отношению к описанным способам и дополнительно обеспечивает линейность регулировочной характеристики (зависимость мощности в нагрузке от управляющего воздействия). К недостаткам способа может быть отнесено то обстоятельство, что форма кривой напряжения на нагрузке при изменении мощности даже в 1 % может существенно отличаться (рис. 5). Такая ситуация требует при переходе от одного значения мощности к другому обязательного выключения всех СК соответствующей нагрузки. Это, в свою очередь, вызывает кратковременные провалы мощности, что может привести к колебаниям температуры, однако только в малоинерционных системах. В печах электросопротивления пропадание питающего напряжения нагревателя на 20 миллисекунд не оказывает влияния на общую температуру и может не учитываться.

#### Анализ энергетических показателей ППН.

При оптимизации коэффициента мощности (рис. 6, а и подробнее на рис. 3) было установлено, что среднее значение коэффициента мощности  $\lambda_4$  на 80 % диапазона регулирования оказывается равным 0,94, что выше

по отношению ко всем рассмотренным ранее способам управления (кривая  $\lambda_3$  соответствует изменению мощности при пятиэтапном способе регулирования мощности в нагрузке ППН). Кроме того, на рис. 6, а в функции относительного значения активной мощности в нагрузке показано изменение  $S^*$  – полной и  $Q^*$  – реактивной мощности.

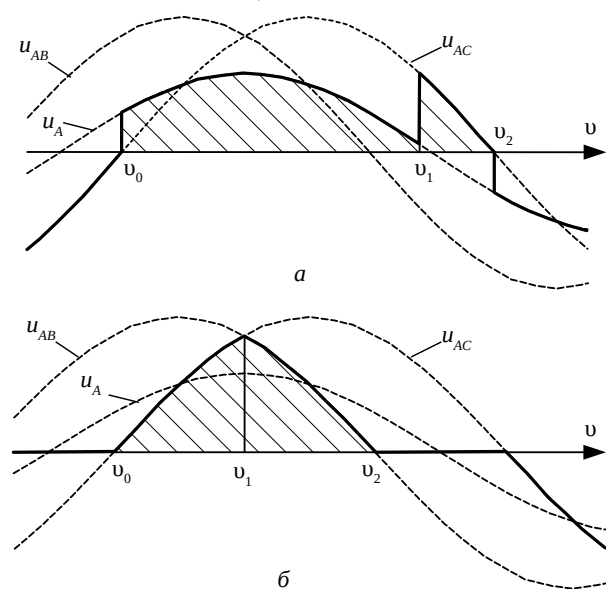


Рис. 5. Кривая тока в нагрузке при  $P^* = 0,27$  (а) и  $P^* = 0,28$  (б)

Для рассмотренного способа оптимального управления на рис. 6, б) в функции относительного значения активной мощности в нагрузке показано изменение  $K_c$  – коэффициента сдвига;  $K_{ис}$  – коэффициента искажений;  $I_1^*$  – относительного значения тока первой гармоники;  $Q^*$  – реактивной мощности. Здесь и далее для расчёта переменных были использованы следующие выражения

$$\Lambda = P^*/S^*; \quad S^* = \sqrt{P^{*2} + Q_{\Pi}^{*2}};$$

$$Q_{\Pi}^* = \sqrt{Q^{*2} + D^{*2} + H^{*2}}; \quad K_C = \cos \varphi;$$

$$K_{\text{ис}} = \sqrt{P^{*2} + Q^{*2}} / \sqrt{P^{*2} + Q^{*2} + D^{*2}},$$

где  $D$  – мощность искажений;

$H$  – мощность несимметрии;

$\varphi$  – фазовый сдвиг основной гармоники тока относительно соответствующего фазного напряжения.

Относительные значения величин во всех случаях получали, принимая за базисное напряжение действующее напряжение питающей сети, а за базисную мощность – максимальную мощность в нагрузке.

Во **втором случае** в качестве критерия оптимальности был выбран коэффициента сдвига  $K_C$ . При этом его среднее значение составило 0,99 на 25 % диапазона регулирования активной мощности в нагрузке (см. рис. 7, а). Здесь же в функции относительного значения активной мощности в нагрузке показано изменение коэффициента мощности  $\lambda$ , относительных значений полной  $S^*$  и пассивной мощности  $Q_{\Pi}^*$ .

В **третьем случае** оптимизировали значение коэффициента искажения  $K_{\text{ис}}$ .

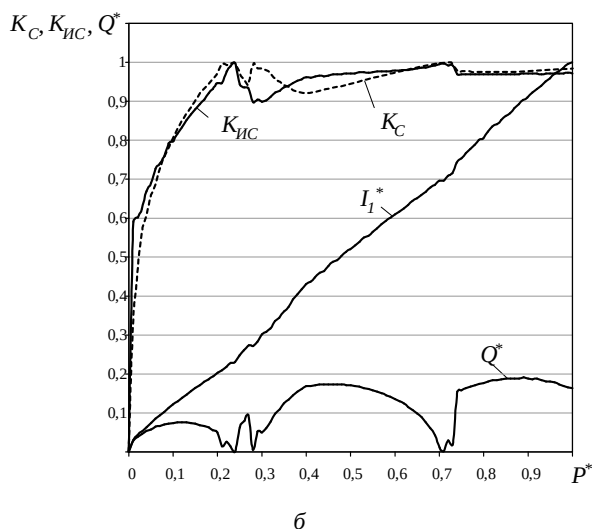
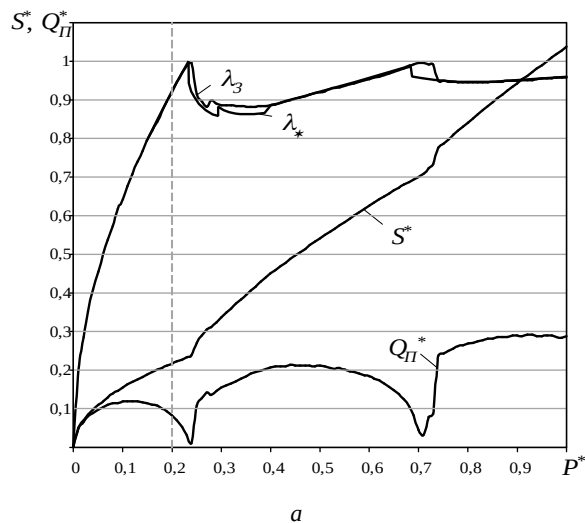


Рис. 6. Энергетические показатели ППН при оптимизации коэффициента мощности

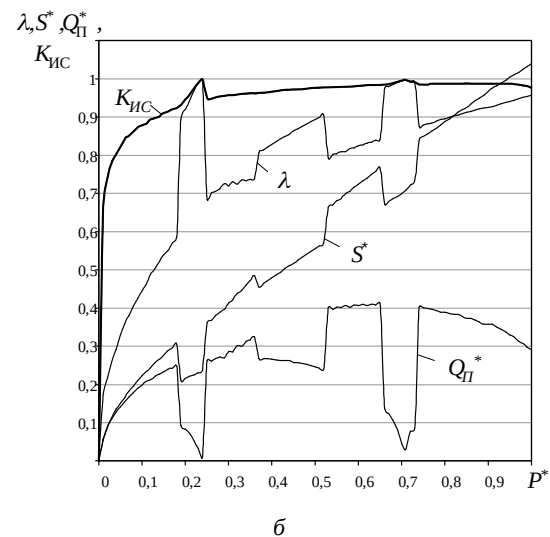
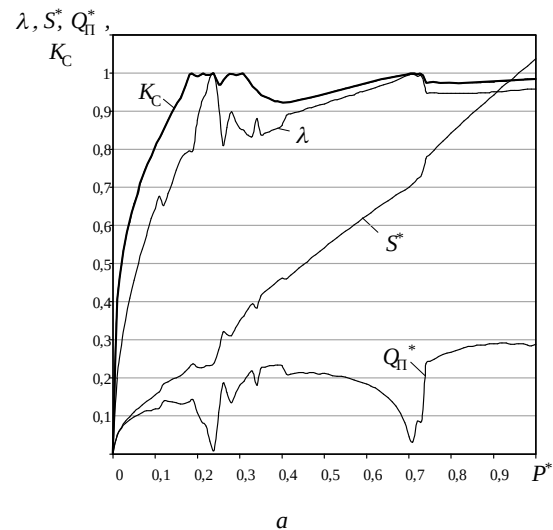


Рис. 7. Энергетические характеристики ППН при оптимизации коэффициента сдвига (а) и коэффициента искажений (б)

При этом его среднее значение составило 0,99 на 45 % диапазона регулирования активной мощности в нагрузке (см. рис. 7, б). На рисунке также в функции относительного значения активной мощности в нагрузке показано изменение коэффициента мощности  $\lambda$ , относительных значений полной  $S^*$  и пассивной мощности  $Q_{\Pi}^*$ .

**Выводы.** Проведенные исследования позволяют утверждать следующее:

- способ оптимального управления трехфазным ППН позволяет обеспечить заданное значение мощности в нагрузке с наилучшим из возможных значений любого энергетического показателя;

- при оптимизации коэффициента мощности удалось обеспечить равенство его среднего значения 0,94 на 80 % диапазона регулирования мощности в нагрузке, что выше по отношению ко всем рассмотренным способам управления;

- применение способа оптимального управления трехфазным ППН особенно целесообразно при высоких мощностях нагрузки с большой тепловой постоянной времени.

## Список литературы

1. Гельман М. В., Дудкин М. М., Преображенский К. А. *Преобразовательная техника: учебное пособие*. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 42 с.
2. Жук А. К., Жук Д. А., Криворучко Д. В., Степенко С. А. Управляемое фильтрокомпенсирующее устройство для автономной электроэнергетической системы с мощными преобразователями. *Технічна електродинаміка*. Київ: ІЕД НАНУ. 2016, № 4. С. 32 – 34.
3. Синчук О. Н., Юрченко Ю. Н., Михайличенко Д. А., Дяченко В. С. О формировании способами широтно-импульсной модуляции выходных форм кривых тока и напряжения для питания электродвигателей переменного тока. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. Тематический вып. Силовая электроника и энергоэффективность*. Харьков: НТУ «ХПИ». 2014, Спец. вып. Т. 2, № 9 (128). С. 107 – 113.
4. Архиреев И. П. *Устройство для регулирования напряжения на трехфазной нагрузке*. Авторское свидетельство СССР № 370600, 1973. URL: <http://patents.su/3-370600-ustroystvo-dlya-regulirovaniya-napryazheniya-na-trekhfaznoj-nagruzke.html>.
5. Кипенский А. В., Архиреев И. П. *Способ регулирования напряжения на трехфазной нагрузке*. Авторское свидетельство СССР № 1778893, 1992. URL: <http://patents.su/11-1778893-sposob-regulirovaniya-napryazheniya-na-trekhfaznoj-nagruzke.html>.
6. Сокол Е. И., Архиреев И. П., Кипенский А. В., Король Е. И. Повышение коэффициента мощности бестрансформаторного трехфазного тиристорного преобразователя переменного напряжения с комбинированным управлением. *Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка та енергоефективність*. Київ: ІЕД НАНУ. 2001, Ч. 2. С. 57 – 60.
7. Сокол Е. И., Архиреев И. П., Кипенский А. В., Король Е. И. Трехфазный тиристорный преобразователь переменного напряжения с повышенным коэффициентом мощности. *Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Проблеми сучасної електротехніки*. Київ: ІЕД НАНУ. 2002, Ч. 1. С. 54 – 59.
8. Sinchuk O. N., Yurchenko YU. N., Mihajlichenko D. A., Dyachenko V. S. *O formirovanii sposobami shirotno-impul'snoj modulyacii vyhodnyh form krivyh toka i napryazheniya dlya pitaniya elektrodvigatelej peremennogo toka* [About formation of output forms of current and stress curve powering of alternating-current electric motors by technologies of pulse-width modulation]. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit. Tematicheskij vyp. Silovaya elektronika i energoeffektivnost'* [Energy saving. Power engineering. Energy audit. Thematic issue Power Electronics and Energy Efficiency]. Har'kov: NTU «HPI». 2014, Spec. vyp. T. 2, № 9 (128). pp. 107 – 113.
9. Arhireev I. P. *Ustrojstvo dlya regulirovaniya napryazheniya na trekhfaznoj nagruzke* [Device for regulating the voltage on a three-phase load]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 370600, 1973. URL: <http://patents.su/3-370600-ustroystvo-dlya-regulirovaniya-napryazheniya-na-trekhfaznoj-nagruzke.html>.
10. Kipenskij A. V., Arhireev I. P. *Sposob regulirovaniya napryazheniya na trekhfaznoj nagruzke* [Method for regulating voltage at a three-phase load]. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1778893, 1992. URL: <http://patents.su/11-1778893-sposob-regulirovaniya-napryazheniya-na-trekhfaznoj-nagruzke.html>.
11. Sokol E. I., Arhireev I. P., Kipenskij A. V., Korol' E. I. *Povyshenie koefficienta moshchnosti bestransformatornogo trekhfaznogo tiristornogo preobrazovatelya peremennogo napryazheniya s kombinirovannym upravleniem* [Improving the power factor of a transformer-free three-phase thyristor AC voltage converter with combined control]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichnyi vyp. Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist'* [Tehnichna elektrodynamika. Thematic issue Power Electronics and Energy Efficiency]. Kyiv: IED NANU. 2001, Ch. 2. pp. 57 – 60.
12. Sokol E. I., Arhireev I. P., Kipenskij A. V., Korol' E. I. *Trekhfaznyj tiristornyj preobrazovatel' peremennogo napryazheniya s povyshennym koefficientom moshchnosti* [Three-phase thyristor AC voltage converter with high power factor]. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematichnyi vyp. Problemy suchasnoi elektrotekhniki* [Thematic issue Problems of modern electrical engineering]. Kyiv: IED NANU. 2002, Ch. 1. pp. 54 – 59.

## References (transliterated)

Поступила 20.06.2019

1. Gel'man M. V., Dudkin M. M., Preobrazhenskij K. A. *Preobrazovatel'naya tekhnika: uchebnoe posobie* [Conversion Technology: teaching manual]. Chelyabinsk: Izdatel'skij centr YUUrGU, 2009. 42 p.
2. Zhuk A. K., Zhuk D. A., Krivoruchko D. V., Stepenko S. A. *Upravlyаемое fil'trokompensiruyushchee ustrojstvo dlya avtonomnoj elektroenergeticheskoy sistemy s moshchnymi preobrazovatelyami* [Controlled filter-compensating device for an autonomous electric power system with powerful converters]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Tehnichna elektrodynamika]. Kyiv: IED NANU. 2016, № 4. pp. 32 – 34.

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Кипенський Андрій Володимирович (Кипенский Андрей Владимирович, Kipenskyi Andrii)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4589-092X; e-mail: kavkpi@ukr.net

**Король Євген Ігорович (Король Евгений Игоревич, Korol Ievgen)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової і біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-9010-8979; e-mail: korolei76@gmail.com

**Горових Микола Іванович (Горовых Николай Иванович, Gorovykh Nikolay)** – інженер-електромеханік; м. Харків, Україна; e-mail: mig195657@gmail.com